

(様式4)

学 位 論 文 の 内 容 の 要 旨

田 尻 真 也 印

(学位論文のタイトル)

Margin estimate and disturbances of irradiation field in layer-stacking carbon-ion beams for respiratory moving targets

(呼吸移動性を伴う標的に対する炭素イオンの積層原体照射法におけるマージン推定と照射野の乱れ)

(学位論文の要旨)

研究背景と目的:

炭素イオンを使った重粒子線治療は、Bragg-peak領域における線量の高い局所性と高い生物効果により体内深くのがん治療に適した治療法である。積層原体照射法を用いた治療は、標的領域をビーム深さ方向に幾つかの層に分割し、層毎の線量分布を重ね合わせて分割照射するので、標的領域以外の正常組織に付与せざるを得ない不要線量を削減することができる。しかし、肺や肝臓といった呼吸性移動を伴う標的の場合、照射中の標的位置が時間により変動するので、層毎の線量分布の重ね合わせが計画通りに行われず、線量分布が悪化する可能性がある。我々の重粒子線治療の治療計画では4DCTの画像より標的の動き量を推定し、マージン量を決定している。呼吸性移動を伴う標的に対するPassive照射法については、測定によりマージン量の妥当性検証を行った。本研究では、呼吸移動性を伴う標的に対する積層原体照射法の治療適用に向けて、呼吸移動性を伴う標的に対するCTV内の線量均一性と適切なマージン量について測定より評価する。

研究方法:

インターナル・マージン (IM) とセットアップ・マージン (SM) の二乗和の平方根をトータル・マージン (TM) とした。まず投与線量の95%の位置となる計画標的体積 (PTV) を定義し、TMより仮想の臨床標的体積 (CTV) を算出した。呼吸移動による線量変化を比較する為、同じ形状の補償フィルタを使用した。炭素イオンなので生物学的効果比 (RBE) を考慮した臨床線量で線量評価すべきであるが、測定可能なのは物理線量である。今回は物理線量の変化が臨床線量の変化に相当すると仮定した。

呼吸運動性ファントムと64個の線量検出部から構成される多層電離箱を利用して、静止時の場合と標的が動く場合の線量分布を測定した。炭素線のエネルギーを400MeV/uとし、静止時の積層原体照射の治療で用いているリッジフィルタ (ミニピーク) を利用し、積層原体照射のスライス厚を2.5mmとした。呼吸による標的の動きは3次元的な楕円の動きと仮定した。直径93mmの球体、5GyEの投与線量の場合とした。また、加速器の運転周期は2.9秒、ビーム出射時間は0.9秒であった。

標的の動きによりビームの通過する位置が変わり、通過する補償フィルタの厚みが増える。標的の側方向の動きは飛程変化に換算して評価を行った。呼吸性移動による線量分布の悪化は、

呼吸性移動のない場合の線量分布と比較して線量評価を行った。呼吸性移動に伴う静止時からの線量の変化を相対線量比に換算して、相対線量比が $\pm 5\%$ 以内となる領域の確認を行った。

結果:

自由呼吸時の標的の側方向の呼吸移動量を大きくする（振幅1mm、4mm、20mm）ほど、仮想CTV内の相対線量比が $\pm 5\%$ を超える領域が大きくなり、線量均一性が悪化した。飛程変化毎の平均相対線量比と 2σ を線形近似より算出して評価した場合、 $\pm 5\%$ 以内の相対線量比に収まる飛程変化の上限が3mmであった。

呼吸移動量を固定（振幅4mm）してビーム強度を半分にした自由呼吸の場合、線量均一性はほぼ同じであった。一方、ビーム強度を半分にした呼吸同期照射（振幅10mm、ゲート閾値4mm）の場合は線量均一性がやや改善し、仮想CTV内のうち $\pm 5\%$ 以内の相対線量比となる占有率が97.2%であった。

考察:

呼吸同期照射の方が自由呼吸の場合より線量均一性が良いのは、呼吸による標的移動が楕円の動きであるので、呼吸同期照射の方が自由呼吸より振幅の変化（飛程変化）が小さいと考えられる。特に照射野辺縁部で線量均一性が際立って悪く、標的の動く方向の照射野辺縁部で低線量域が、動く方向と逆側の照射野辺縁部で低線量領域が発生しやすかった。側方向の位置毎の飛程変化とマージン量を比較して評価した場合、照射野辺縁部の飛程変化がより大きく、側方向の追加マージンと末端側の追加マージンが必要であった。1スライス厚に相当する2.5mmを追加マージンとした場合、標的の側方向の呼吸移動量が小さい（振幅1mm、4mm）場合の飛程変化もマージンの範囲内にほぼ収まった。また、 $\pm 5\%$ 以内の相対線量比に収まる飛程変化の上限が5mmへ上がった。呼吸同期照射（ゲート閾値4mm）の場合の占有率が99.2%となり、線量均一性が改善した。しかし、呼吸移動量が大きい（振幅20mm）の場合も線量均一性が改善したものの、占有率が95.6%しかなかったので、呼吸移動量の上限が必要である。2スライス厚に相当する5mmの追加マージンとした場合、更に仮想CTV内の線量均一性が改善した。

結論:

リッジフィルタの形状に従い相対線量比が変わるが、呼吸移動量（即ち、飛程変化）に上限を設け、追加マージンを適用すれば、今回のリッジフィルタでも $\pm 5\%$ 以内の相対線量比となる線量均一性を達成できた。炭素線の積層原体照射の場合、線量均一性はスライス間の重ね合わせにより達成される。呼吸性移動を伴う標的に対する臨床上の標的中の線量均一性はリッジフィルタの形状だけでなく、補償フィルタの形状にも大いに依存する。実際の治療の場合、補償フィルタの形状を考慮して標的の呼吸移動量の上限を考慮すべきである。

（2000字程度）